



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 196 16 187 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
H 05 H 1/46
// H 01 J 37/32

②1 Aktenzeichen: 196 16 187.8
②2 Anmeldetag: 23. 4. 96
②3 Offenlegungstag: 6. 11. 97

DE 196 16 187 A 1

⑦1 Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

⑦2 Erfinder:

Neff, Willi, Dr., Kelmis, BE; Pochner, Klaus, 52074
Aachen, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:

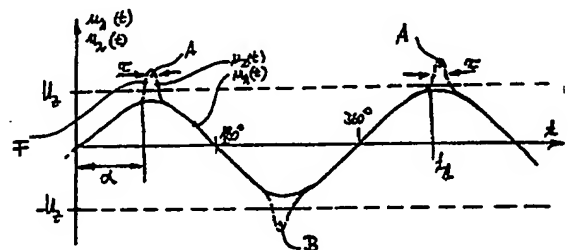
DE	43 11 455 A1
DE	43 07 768 A1
DE	41 27 317 A1
DE	41 12 161 A1
DD	2 95 061 A5

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

Der Inhalt dieser Schrift weicht von den am Anmeldetag eingereichten Unterlagen ab

⑤4 Vorrichtung zum Anregen elektrischer Entladungen mittels getakteter Spannungsspitzen

⑤7 Vorgeschlagen wird ein Verfahren zur Anregung von Gasentladungen (G), bei dem die Gasentladung (G) mit einer ersten Wechselspannung ($u_1(t)$) im Bereich zwischen 500 Hz und 5000 Hz noch ohne Zündung der Gasentladung beaufschlagt wird und der ersten Wechselspannung ($u_1(t)$) ein Spannungspuls (A, B, A'B') mit ihr gegenüber deutlich kürzerer Anstiegszeit überlagert wird, um die Gasentladung (G) zu zünden. Erreicht wird damit, die Anregung einer Gasentladung als starke kapazitive Last, insbesondere das Zünden dieser Last verlustarm auszugestalten. Wird der Anregungsspannung (ersten Wechselspannung) ein kurzzeitiger Spannungspuls als Leistungspuls überlagert, so kann die eingebrachte Leistung erhöht und die Verteilungsfunktion zu höheren Teilchenenergien hin verschoben werden.



DE 196 16 187 A 1

Beschreibung der Erfindung

Die Anregung elektrischer Entladungen in Gasen erfolgt nach Stand der Technik häufig mit hochfrequenter Wechsellspannung. Für viele plasmachemische oder plasmaphysikalische Prozesse ist es erforderlich, bereits bei mäßiger mittlerer Leistung hohe Spitzenleistungen zu erreichen. Ein bekanntes Verfahren ist die Austastung niederfrequenter Pulsgruppen aus einer hochfrequenten Grundschiwingung mittels zu regelmäßigen Zeitpunkten geschalteten Halbleiterelementen, das im folgenden getaktete Anregung genannt wird. Gegenstand dieser Erfindung ist das Prinzip, umgekehrt durch Zuschalten einer höchstfrequenten Komponente zu einer niederfrequenten Grundschiwingung eine kurzzeitige Leistungsüberhöhung zu erreichen.

Technische Anwendungsgebiete

Plasmagestützte Prozesse kommen bei der Deposition von Schichtsystemen in der Halbleiterherstellung oder Werkstückveredelung, bei der Teilereinigung und bei plasmachemischen Umsetzungen in der Gasphase zum Einsatz. Besonders die Nachbehandlung von Abgasen aus Verbrennungsmotoren, mit dem Ziel Stickoxide oder Kohlenwasserstoffe zu vermindern, ist ein Anwendungsfall, wo beste energetische Wirkungsgrade erforderlich sind. Aber auch für die Oberflächenbehandlung ist eine Verminderung des Energieeinsatzes nötig; hier weniger aufgrund der elektrischen Anschlußleistung der Generatoren, als vielmehr um die Wärmebelastung der Bauteile im tolerierbaren Bereich zu halten.

Zur Beschichtung kommen vor allem Niederdruckplasmen vom Typ der Glimmentladung zum Einsatz. Hier werden im Druckbereich von 1–100 Pa diffuse Gasentladungen von 50–1000 mm Ausdehnung erzeugt. Bei Zufuhr reaktiver Gase werden diese im Entladungsbereich zersetzt und an Oberflächen in der Umgebung, die zu Werkstücken aber auch zu Rezipientenwänden gehören können, findet die Schichtdeposition statt.

Abtragen durch Plasmen wird vorwiegend mit edelgas-, sauerstoff- oder halogenhaltigen Gasen von 0,01–1 Pa Druck durchgeführt. Bei Verwendung von Edelgasen findet ein Herausschlagen von Atomen aus der zu behandelnden Oberfläche durch Einschlag schneller positiver Ionen statt. Reaktivgase können diesen Prozeß verstärken oder die Selektivität erhöhen, indem zusätzlich chemische Energie zur Verfügung gestellt wird.

Bogenentladungen in einem weiten Druckbereich von Niederdruck bis hin zum Atmosphärendruck eignen sich zur Erzeugung lokalisierter Plasmen von wenigen Millimetern Ausdehnung. Durch diese heißen Bereiche kann entweder für die Umsetzung von Gasen das zu behandelnde Gas geströmt werden oder es wird mittels eines Arbeitsgasstrahls die Energie aus dem Bogen zu der Behandlungszone transportiert.

Im atmosphärischen Druckbereich kommen vor allem Barrierenentladungen oder Koronaentladungen zum Einsatz, die es erlauben, trotz der hohen Stoßfrequenz zwischen Elektronen und schweren Teilchen eine nichtthermische Energieverteilung einzustellen. Im Fall der Barrierenentladung wird durch ein Selbstabschalten der Entladung die Energie nur während eines kurzen

Zeitfensters von 5–50 ns eingebracht, während die Koronaentladung mittels spitzer oder kantiger Elektroden ein stark inhomogenes elektrisches Feld erzeugt. In beiden Fällen wird den Elektronen nur kurz Energie zugeführt, so daß nur wenige Stöße stattfinden können.

Nachteile des Standes der Technik

Plasmachemische und plasmaphysikalische Prozesse werden durch schnelle, im Plasma gebildete, Teilchen ausgelöst. Dies sind negativ geladene Elektronen und positiv geladene Ionen, die durch Ionisierung im elektrischen Feld gebildet und zwischen den Stößen mit anderen Gasteilchen beschleunigt werden. Dadurch ergeben sich jeweils besondere Energieverteilungsfunktionen, denen gemeinsam ist, daß relativ viele Teilchen eine niedrige kinetische Energie besitzen und nur wenige Teilchen oberhalb der Mindestenergie vorliegen, die für den erwünschten Prozeß erforderlich ist. Damit läuft der Prozeß vergleichsweise langsam ab; die niederenergetischen Teilchen tragen jedoch in erheblichem Maße zum elektrischen Leistungsbedarf und zu den thermischen Verlusten in der Entladung bei.

Eine Verminderung der eingebrachten Leistung verlangsamt den Plasmaprozeß noch weiter, während eine Leistungserhöhung zu einer Verstärkung von unerwünschten Aufheizeffekten führt. Es ist bekannt, durch Austastung von Pulsgruppen aus der hochfrequenten Anregungsspannung die im zeitlichen Mittel eingebrachte Leistung zu vermindern, ohne die momentane Leistung, die für die Energieverteilung ausschlaggebend ist, zu verändern. Dabei wird ausgenutzt, daß die Aufheizung von Gas und Oberflächen ein vergleichsweise langsam ablaufender Vorgang ist, während die Einstellung der Energieverteilung auf deutlich kürzerer Zeitskala abläuft. Werden jedoch Plasmaprozesse mit schnellen Flächenraten oder hohen Gasdurchsätzen erwartet, so ist es erforderlich, die durch die Pausen in der Anregung entstandene Verminderung der mittleren Leistung durch eine Erhöhung der momentanen Leistung zu kompensieren. Die damit verbundene Spannungserhöhung erreicht jedoch Grenzen der Generator und Übertragungstechnik oder führt zur Ausbildung von Instabilitäten in der Entladung.

Erreichte Verbesserungen gegenüber dem Stand der Technik

Wird nun jedoch der Anregungsspannung ein kurzzeitiger Leistungspuls überlagert, so kann die eingebrachte Leistung weiter erhöht und die Verteilungsfunktion zu höheren Teilchenenergien hin verschoben werden.

Vor der Zündung einer Gasentladung stellen die Elektroden eines Plasmasystems vornehmlich eine kapazitive Last dar, die – induktiv über einen Transformator mit einem Taktgeber gekoppelt – als Schwingkreis mit hoher Güte, d. h. mit verschwindenden elektrischen Verlusten, betrieben werden kann. Die elektrische Spannung zwischen den Elektroden kann dabei erhebliche Werte erreichen, wobei bis zu Amplituden knapp unter der Zündspannung kein nennenswerter Energieverbrauch stattfindet. Bei einer geringfügigen weiteren Spannungserhöhung zündet die Gasentladung und nimmt etwas Leistung aus dem Schwingkreis auf, bis die anliegende Spannung wieder unter die Löschspannung, die in der Regel niedriger als die Zündspannung ist, abfällt. Um eine Zündung der Gasentladung im ganzen

Volumen zu erreichen, muß jedoch erheblich Leistung zugeführt werden, indem die Spannungsamplitude deutlich über die Zündspannung erhöht wird. Bei sinusförmigen Spannungen heißt dies, daß während eines signifikanten Anteils der Periodendauer die momentane Spannung über der Zündspannung liegt und sich im Elektrodensystem ein gezündetes Plasma befindet. Dies verändert jedoch die Kapazität der Elektroden und damit die Resonanzfrequenz des Schwingkreises; aufgrund der Fehlanpassung kommt es zu elektrischen Verlusten, die sich zur im Plasma umgesetzten Leistung addieren und den Wirkungsgrad der elektrischen Anregung bestimmen.

Die Literatur kennt verschiedene Generatortypen, die diesem Verhalten von Gasentladungen durch nicht sinusförmige Spannungen zu begegnen suchen.

Eine besonders effektive Methode zur Erzeugung hoher Spannungen wird in [1] beschrieben. Unter Verwendung von Grundschaltungen, die aus der Schalttechnik bekannt sind, wird gleichgerichtete und geglättete Netzspannung erneut, diesmal aber hochfrequent, zerhackt und hochtransformiert. Bei phasenrichtiger Ansteuerung der primärseitigen Schalttransistoren wird aufgrund des Frequenzganges des oder der Transformatoren eine annähernd sinusförmige Spannung mit sehr hohem Wirkungsgrad von deutlich über 90% erzielt. In [2] wird dieses Anregungsprinzip weitergebildet, indem die Schaltzeitpunkte der Transistoren so verändert werden, daß sich nicht sinusförmige (auch anharmonisch genannte) Spannungsformen ergeben. Zwar kann damit, insbesondere bei Niederdruckentladungen, eine vorteilhafte Beeinflussung des Plasmas erreicht werden, jedoch sinkt der elektrische Wirkungsgrad der Anregung deutlich ab.

Eine besonders freizügige Regelung des Spannungsverlaufs wird möglich, wenn auf die Übertragung mittels eines Transformators verzichtet wird und leistungsfähige Gleichspannungsquellen über Schaltelemente niederinduktiv direkt mit der Last verbunden werden [3]. Neben Rechteckspannungen beliebiger Polarität, Frequenz, Einschaltdauer und Tastverhältnisses werden auch Gruppen schneller Spannungsspeaks zu sehr phantasievollen Pulsmustern zusammengefaßt. Während sich bei geschickter Auswahl dieser Muster durchaus Verbesserungen für die jeweilige Gasentladung ergeben, ist der beschriebene Generatortyp aufgrund der fehlenden Rückpeisemöglichkeit von Blindströmen leider energetisch ineffektiv.

Von Untersuchungen an Barrierenentladungen zur Schadstoffminderung in Abgasen [4, 5] ist jedoch bekannt, daß derartige Rechteckspannungen in der Entladung selbst bessere Wirkungsgrade ermöglichen. Versuche, annähernd rechteckige Spannungen mit schnellen Anstiegen zu erzeugen, indem spezielle Pulstransformatoren kurzzeitig angesteuert werden, zeigen bisher jedoch nur unbefriedigende Wirkungsgrade [6, 7]. Die Anregungsspannungen zeigen zudem unkontrollierte Überschwinger nach den Anstiegen, die unter Verlusten weggedämpft werden müssen oder, insbesondere bei kapazitiv angeregten Gasentladungen, zu unerwünschten Rückzündungen führen können.

Eine spezielle Form der Pulsgruppenmodulation wird erreicht, wenn zwei kontinuierliche Sinusspannungen deutlich unterschiedlicher Frequenz, beispielsweise 10 kHz und 27 MHz, überlagert werden [8]. Entsprechend einer Schwebung erhält die Amplitude der einen hochfrequenten Sinusspannung eine ebenfalls sinusförmige Einhüllende, wodurch der zeitliche Verlauf der

Leistungsdichte im Plasma in vorteilhafter Weise moduliert werden kann.

Ein sehr ähnliches, jedoch deutlich weitergehendes Prinzip der Überlagerung sinusförmiger Spannungen wird in [9] beschrieben. Hier werden jedoch Frequenzen ähnlicher Größenordnung benutzt, die geradzahlige Harmonische einer Grundfrequenz sind und die sich entsprechend der Fouriersynthese periodisch zu großen Strom- oder Spannungspulsen konstruktiv überlagern. Jede der mit unterschiedlicher Frequenz betriebenen Stufen dieses Generators speichert über längere Zeit in einem Schwingkreis etwa die gleiche Energie, die dann von allen Stufen gleichzeitig an die Last abgegeben wird. In Anwendungsfällen, wo ein gigantischer freistehender Spannungspuls von bis zu 100 kV Amplitude nicht erforderlich ist, verbietet sich jedoch der hohe Schaltungsaufwand zum phasenrichtigen Betreiben von fünf oder mehr einzelnen Stufen, die jeweils dem in [1] beschriebenen Prinzip entsprechen.

Literaturverzeichnis

- [1] J. KLEIN: Hochspannungsgenerator für elektrische, kapazitive Anteile enthaltende Lasten, insbesondere für Laser. Patentanmeldung DE 41 12 161, 13. April 1991.
- [2] W. NEFF, K. POCHNER, J. KLEIN, R. LEBERT, P. LOOSEN: Verfahren zur Anregung von Gasentladungen. Patentanmeldung DE 43 07 768, 11. März 1993.
- [3] G. MARK, ET AL. Produktinformation, Magtron GmbH, Ottersweier, 1995.
- [4] S. BRÖER, T. HAMMER, M. RÖMHELD: Abstract zu Behandlung von Diesellabgasen durch dielektrisch behinderte Entladungen; Verh. DPG (VI) 31(1996) 741.
- [5] S. BRÖER, T. HAMMER, M. RÖMHELD: Behandlung von Diesellabgasen durch dielektrisch behinderte Entladungen. Vortrag, DPG-Frühjahrstagung Plasmaphysik, Rostock, 19. März 1996.
- [6] M. SPAAN, H. F. DÖBELE: Abstract zu Untersuchungen zur Elektronenenergie in einer dielektrisch behinderten Entladung in N_2/O_2 -Gemischen; Verh. DPG (VI) 31(1996) 725.
- [7] M. SPAAN, H. F. DÖBELE: Untersuchungen zur Elektronenenergie in einer dielektrisch behinderten Entladung in N_2/O_2 -Gemischen. Poster, DPG-Frühjahrstagung Plasmaphysik, Rostock, 19. März 1996.
- [8] A. DEHOFF, W. MATTKE: Schaltungsanordnung für Plasmareaktoren. Patentanmeldung DD 2 95 061, 11. Apr. 1990.
- [9] J. KLEIN: Pulsspannungsquelle. Patentanmeldung DE 43 11 455, 1993.

Grundzüge des Lösungsweges

Entscheidende Parameter für die Energieverteilung in Gasentladungen sind die im Gas herrschende elektrische Feldstärke und die Teilchendichte. Die Gasdichte ist jedoch durch Druck und Temperatur bestimmt und wird meist durch den Anwendungsfall diktiert. Eine Erhöhung der mittleren kinetischen Energie ist also nur durch Erhöhung der Feldstärke möglich. Die Feldstärke zum Zeitpunkt der Zündung ist jedoch ihrerseits durch die Gasart vorgegeben. Da ein zufälliges Vorhandensein freier Ladungsträger für die Initiierung der Ionisierung erforderlich ist, ist die Zündung einer Gasentladung ein statistischer Prozeß, mit einer gewissen zeitlichen Schwankung. Vom Überschreiten der theoretischen

schen Zündfeldstärke an bleibt also ein kurzer zufallsbestimmter Zeitraum, bis tatsächlich die Zündung erfolgt. Die Energieverteilung wird jedoch durch die tatsächlich herrschende Feldstärke bestimmt, so daß eine schnelle Erhöhung der angelegten Spannung höhere mittlere Teilchenenergien zur Folge hat.

Verfahren, die mit extrem hohen Anregungsfrequenzen die erforderlichen kurzen Anstiegszeiten der Spannung realisieren, sind technisch aufwendig und mit schlechtem elektrischen Wirkungsgrad behaftet. Im Sinne der vorliegenden Erfindung wird daher mit niedriger Frequenz und folglich langsamem Spannungsanstieg das System bis knapp an die Zündgrenze gebracht. Dies ist mit geringem Schaltungsaufwand und hohen elektrischen Wirkungsgraden möglich. Kurz vor dem Spannungsmaximum der Grundfrequenz wird dann ein für schnelle Anstiegszeiten optimierter Spannungspuls überlagert, der die Gasentladung zum Zünden bringt. Die dabei auftretenden elektrischen Verluste tragen aufgrund der kurzen Dauer kaum zu einer Wirkungsgradabnahme bei.

Alternativ kann der kurze Spannungspuls auch bereits in der ansteigenden Flanke der Grundschwingung überlagert werden, wodurch sich der steilere Anstieg schon bei niedrigerer momentaner Anregungsspannung auswirkt. Eine Weiterbildung der Erfindung stellt die Überlagerung einer schnellen bipolaren Pulsspannung zum Zeitpunkt des Nulldurchgangs der Grundschwingung dar. Letzteres kann bei Systemen mit dielektrischen Elektroden und kapazitiver Anregung erforderlich sein, um bereits bei der, aufgrund von Oberflächenladungen verfrühten, Rückzündung den steilen Spannungsanstieg anzubieten.

Ausführungsbeispiele

Ohne die Allgemeinheit der Erfindung für die Verwendung mit anderen Typen von Gasentladungen zu beschränken wird im folgenden die Funktionsweise anhand einer Barrierenentladung bei Atmosphärendruck erläutert.

Abb. 1 zeigt mit durchgezogener Linie den zeitlichen Spannungsverlauf $U(t)$ einer Wechsellspannung mit niederfrequenter Grundschwingung, die für sich alleine genommen die Entladung nicht zu zünden vermag. Die waagerechten gestrichelten Linien zeigen für die positive und negative Spannungshalbwelle jeweils die Zündspannungen U_z , die mindestens überschritten werden müssen, um eine Gasentladung zu erzeugen. Werden nun mit einer Phasenverschiebung von ΔL zusätzlich hochfrequente Spannungspulse (A, B) angelegt, so kann jeweils für kurze Zeit eine Entladung zünden. Aus Gründen der besseren Sichtbarkeit sind die gestrichelt eingezeichneten Spannungspulse länger als nötig dargestellt. Im Falle einer Barrierenentladung kommt hinzu, daß auch während der kurzen Zeitdauer τ die Entladung nicht ständig brennt, sondern nur für jeweils wenige Nanosekunden kurz nach Überschreiten der Zündspannungsgrenze, also beispielsweise zum Zeitpunkt t_1 . Ein günstiger Wert für die Frequenz der niederfrequenten Schwingung liegt zwischen 500 und 5 000 Hertz; die kurzen Spannungspulse sollten etwas länger als die Dauer des Stromflusses in der Barrierenentladung, d. h. nach derzeitigem Stand der Technik so kurz wie schaltungstechnisch möglich, sein, aber zumindest einige Mikrosekunden nicht überschreiten.

Der zeitliche Verlauf der Spannungspulse ist in Abb. 3 wiedergegeben. Die Spannungspulse können un-

ipolar (Pulsfolge A-A-A-...) oder bipolar (A-B-A-B-...) angelegt werden. Darüber hinaus kann die in die Entladung eingebrachte Leistung durch Austastung einzelner Pulse oder von Pulsgruppen geregelt werden. Hierbei macht man sich erneut den Umstand zu Nutze, daß die während der ganzen Zeit weiter anliegende Spannung mit der niederfrequenten Grundschwingung alleine die Zündspannung nicht überschreitet und damit verlustarm ist.

Eine andere Korrelation der sinusförmigen Grundspannung mit den Spannungspulsen ergibt sich in Abb. 2 durch Verstellen des Zeitdelays Δt . Der kurze Puls liegt nunmehr bereits in der ansteigenden Flanke der Spannung an. Hier kann es vorteilhaft sein, wie eben beschrieben die niederfrequente Spannung unter der Zündspannung U_z zu halten (angedeutet durch Linie 1), oder darüber (Linie 2). Die letztere Möglichkeit erlaubt, den Puls, wie dargestellt, gerade zum Zeitpunkt des Überschreitens der Zündspannung anzulegen, wodurch während der kritischen Phase des statistischen Zeitdelays bis zur tatsächlichen Zündung die Feldstärke gesteigert werden kann.

In Abb. 4 und Abb. 5 sind die der Grundschwingung (1) überlagerten Spannungen (2) ebenfalls sinusförmig und besitzen die drei- bzw. fünffache Frequenz. Dadurch lassen sich weitgehend rechteckähnliche Ausgangsspannungen erzeugen. Gegenüber den mit dem Stand der Technik erzeugten, viel schöneren, Rechtecken hat die Erzeugung im Sinne der Erfindung den Vorteil technischer Einfachheit. Wichtig ist dabei, daß die Restwelligkeit der Spannung den Entladungsverlauf nicht stört, solange die überlagerte hochfrequente Komponente für sich alleine nicht die Zündspannung U_z überschreitet. Eine erneute und hier unerwünschte Zündung einer Barrierenentladung wird nämlich nur stattfinden, wenn nach Verlöschen der vorhergehenden Entladung der Betrag der Spannungsänderung höher wird, als die (von der Nulllinie an gerechnete) Zündspannung. Ohne Beschränkung sind nach diesem Prinzip auch die Überlagerung höherer ungeradzahlgiger Harmonischer (3, 5, 7, 9, ...) möglich, wenngleich die Unterdrückung der unerwünschten Rückzündungen zunehmend schwieriger wird.

Schließlich zeigt Abb. 6 einen Ausweg, um nach dem gleichen Prinzip doch zu höheren Frequenzanteilen zu gelangen. Einzelne, in der zweiten Reihe erneut separat gezeichnete, bipolare Pulse werden jeweils zum Zeitpunkt des Nulldurchganges der Grundschwingung zugeschaltet. Es spielt dabei kaum eine Rolle, ob, wie in der dritten Reihe dargestellt, der hochfrequente Puls Überschwinger zeigt, solange die Amplitude des ersten Überschwingers für sich alleine betrachtet nicht die Zündspannung übersteigt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Anregung von Gasentladungen (G), bei dem die Gasentladung (G) mit einer ersten Wechsellspannung ($u_1(t)$) im Bereich zwischen 500 Hz und 5000 Hz, noch ohne Zündung der Gasentladung beaufschlagt wird und der ersten Wechsellspannung ($u_1(t)$) ein Spannungspuls (A,B,A'B') mit ihr gegenüber deutlich kürzerer Anstiegszeit überlagert wird, um die Gasentladung (G) zu zünden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz der ersten Wechsellspannung nahe der Resonanzfrequenz des von der

kapazitiv wirkenden ungezündeten Gasentladung (G) und der Induktivität eines Transformators des Taktgebers gebildeten Schwingkreises liegt.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Spannungspulse (A, B) schnelle Anstiegszeiten haben, wobei ihre Dauer eine Mikrosekunden nicht überschreitet. 5

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Spannungspulse (A, B) zum Zeitpunkt der Zündung der Gasentladung angelegt werden, bevorzugt pro Halbwelle nur ein einzelner Spannungspuls (A, B) oder ein einzelner Doppel-Spannungspuls (A', B') überlagert wird. 10

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Amplitude der ersten Wechselspannung ($u_1(t)$) ohne Überlagerung der Spannungspulse (A, B) nicht für eine Zündung der Gasentladung ausreicht. 15

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Spannungspulse
(a) als bipolare Pulse (A) in jeder Halbwelle der ersten Wechselspannung mit abwechselnder Polarität überlagert werden; oder
(b) als unipolare Pulse (A', B'; A, B) stets die gleiche Polarität aufweisen und nur in einer der Halbwellen der ersten Wechselspannung zugeschaltet werden. 20 25

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Spannungspuls zu einem Zeitpunkt (α) kurz vor dem Spannungsmaximum der ersten Wechselspannung (u_1) überlagert wird. 30

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Spannungspuls in der Anstiegsflanke, insbesondere nahe am Nulldurchgang der ersten Wechselspannung ($u_1(t)$) überlagert wird. 35

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Spannungspulsen einzelne Pulse oder Pulsgruppen ausgesteuert werden. 40

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Spannungspulse (A', B') bipolar sind, wobei sie aus jeweils zeitlich aufeinander folgenden positivem und negativem Anteil bestehen. 45

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die bipolaren Spannungspulse jeweils zum Zeitpunkt des Nulldurchganges der Wechselspannung angelegt werden. 50

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß die bipolaren Spannungspulse zu einem Wellenzug verknüpft werden, der jeweils zum Zeitpunkt eines Nulldurchgangs der Wechselspannung einen resultierenden steileren Nulldurchgang der Gesamtspannung erzeugt. 55

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Wiederholfrequenz des Wellenzuges ein ungeradzahliges Vielfaches der Frequenz der ersten Wechselspannung darstellt. 60

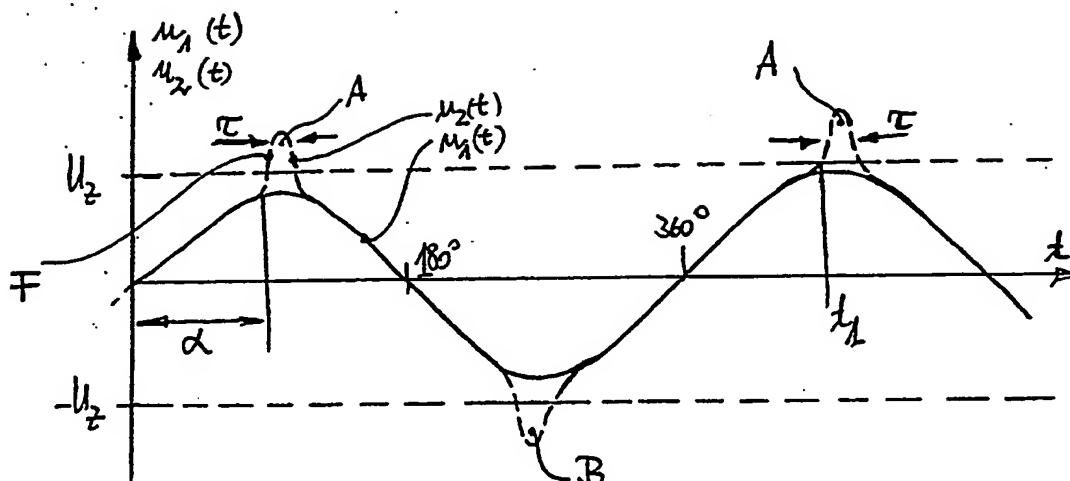


Fig. 1

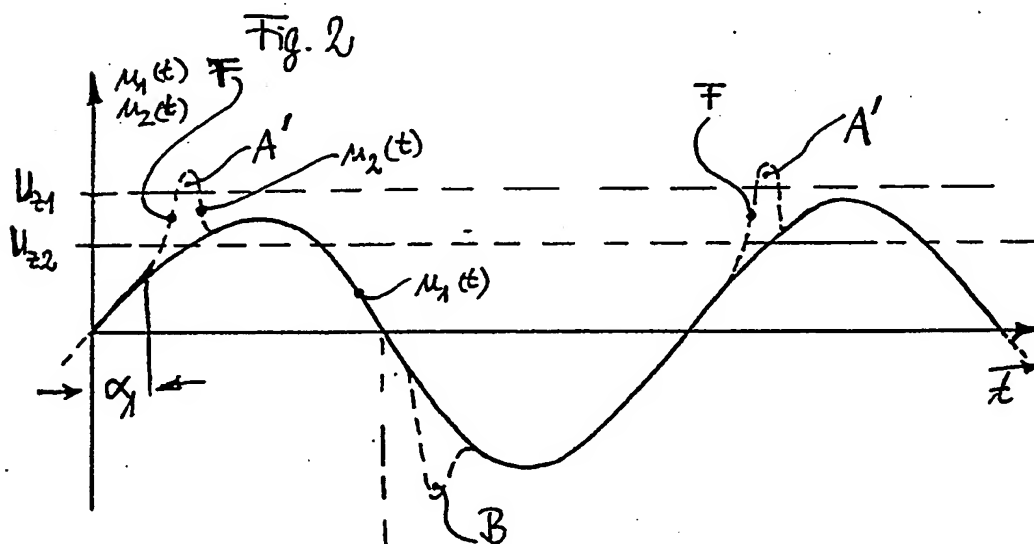


Fig. 2

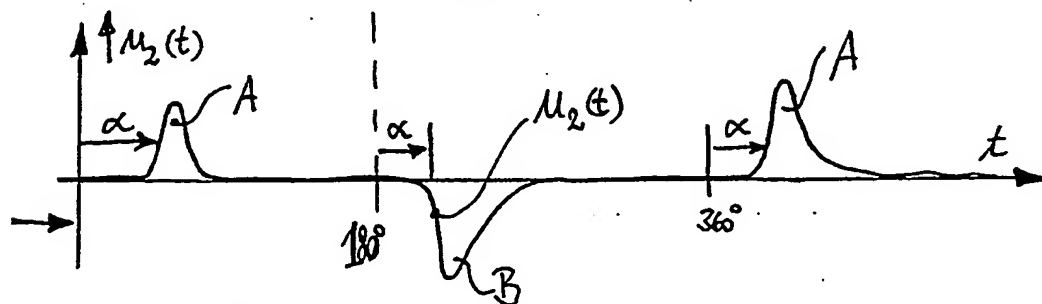


Fig. 3

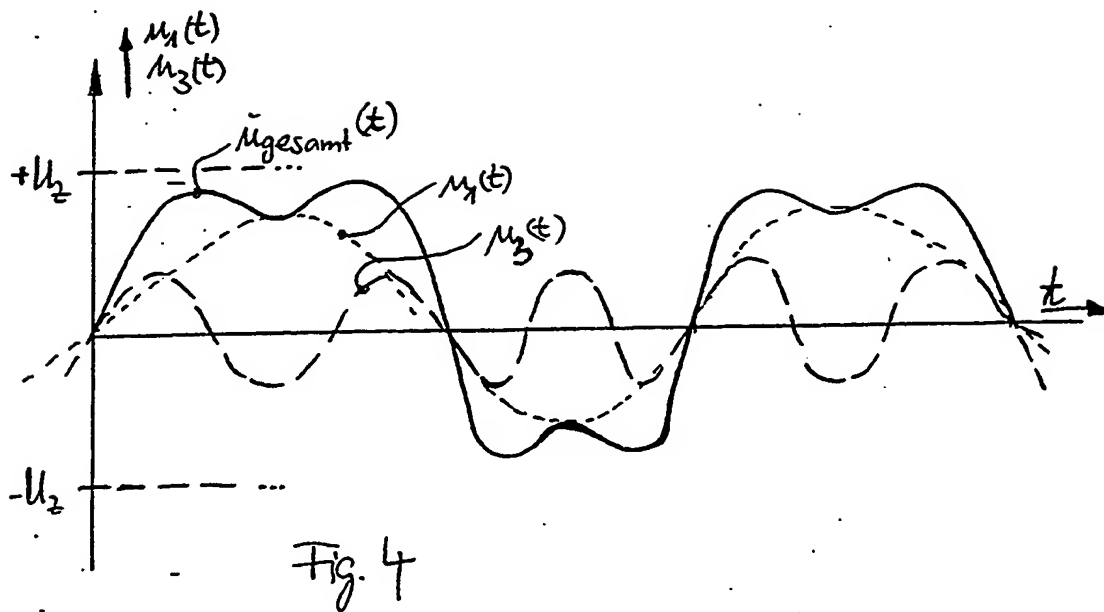


Fig. 5

